11 月 November
2020, 63(11): 1358 - 1365
昆 虫 学 报
ACTA ENTOMOLOGICA SINICA
http://www.insect.org.cn
doi: 10.16380/j.kcxb.2020.11.008

温度对亚洲小车蝗成虫体内呼吸代谢相关酶和抗氧化酶活性的影响

郭 娜[1], 高书晶[1,*], 王 宁[1], 韩海斌[1], 徐林波[1], 董瑞文[2], 娜仁满都呼[2], 娜布其亚[2]

(1. 中国农业科学院草原研究所, 呼和浩特 010010; 2. 乌兰察布盟四子王旗草原站, 内蒙古乌兰察布 011800)

摘要:【目的】阐明亚洲小车蝗 *Oedaleus asiaticus* 高温耐受能力,明确温度对亚洲小车蝗成虫体内呼吸代谢相关酶和抗氧化酶活性的影响。【方法】在 18 ~ 42℃ 温度范围内,以 3℃ 为间隔设置 9 个温度处理,将亚洲小车蝗成虫置于光照培养箱黑暗条件下处理 4 h,后于室温条件下恢复1 h。采用生化方法测定各处理成虫体内糖类代谢酶 3-磷酸甘油醛脱氢酶(GAPDH)和 3-磷酸甘油脱氢酶(GPDH),脂类代谢酶 3-羟酰辅酶 A 脱氢酶(HOAD)和三羧酸循环关键酶柠檬酸合成酶(CS),以及 3 种抗氧化酶超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)的活性。【结果】实验所测的亚洲小车蝗雌雄成虫体内 7 种呼吸代谢相关酶和抗氧化酶活性均随温度升高呈现先增后减的趋势。雌雄成虫 GAPDH, GPDH, HOAD 和 CS 活性分别在 33, 27, 33 和 39℃ 时最高,而 SOD, CAT 和 POD 活性均在 30℃ 时最高;所测 7 种酶活性均在 18℃ 时最低。在大多数测试温度下雌雄成虫酶活性差异显著。不同温度下雌、雄成虫的 GAPDH/HOAD 活性比值在 1.99 ~ 3.31 之间,说明在实验温度下亚洲小车蝗呼吸代谢主要消耗糖类物质。【结论】在测试的 18 ~ 42℃ 温度范围内亚洲小车蝗成虫体内呼吸代谢相关酶和抗氧化酶活性随温度升高呈先增后减的趋势,亚洲小车蝗成虫通过调节呼吸代谢及抗氧化酶活性而适应温度变化。

关键词: 亚洲小车蝗; 温度; 呼吸代谢; 抗氧化酶; 酶活性

中图分类号: Q968 **文献标识码**: A **文章编号**: 0454-6296(2020)11-1358-08

Effects of temperature on the activities of respiratory metabolism-related and antioxidant enzymes in adults of *Oedaleus asiaticus* (Orthoptera: Acridoidea)

GUO Na[1], GAO Shu-Jing[1,*], WANG Ning[1], HAN Hai-Bin[1], XU Lin-Bo[1], DONG Rui-Wen[2], Narenmanduhu[2], Nabuqiya[2] (1. Grassland Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hohhot 010010, China; 2. Dorbod Banner Grassland Station of Ulanqab City, Ulanqab, Inner Mongolia 011800, China)

Abstract:【Aim】To elucidate the high temperature tolerance of *Oedaleus asiaticus* and the effect of temperature on the activities of respiratory metabolism-related and antioxidant enzymes in *O. asiaticus* adults.【Methods】Adults of *O. asiaticus* were exposed to nine temperature treatments in the range of 18 - 42℃ at 3℃ intervals under dark conditions in light incubator for 4 h and then recovered at room temperature for 1 h. The activities of respiratory metabolism-related enzymes glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase (GAPDH), glycerol-3-phosphate dehydrogenase (GPDH), 3-hydroxyacyl-CoA

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(1610332018018, 1610332020008); 国家科技基础资源调查专项(2019FY100400)
作者简介: 郭娜, 女, 1996 年出生, 内蒙古呼和浩特人, 硕士研究生, 研究方向为昆虫生态学, E-mail: guonae@163.com
* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: shujinggao688@163.com
收稿日期 Received: 2020-04-23; 接受日期 Accepted: 2020-06-01

dehydrogenase (HOAD) and citrate synthase (CS), and antioxidant enzymes superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and peroxidase (POD) in the adults of all the treatments were determined by biochemical method.【Results】The activities of the seven respiratory metabolism-related and antioxidant enzymes in *O. asiaticus* adults assayed in the experiment increased first and then decreased with the temperature increasing. The activities of GAPDH, GPDH, HOAD and CS were the highest at 33, 27, 33 and 39℃, respectively, while those of SOD, CAT and POD were the highest at 30℃. The activities of all the tested seven enzymes were the lowest at 18℃. There was significant difference in the enzyme activities between female and male adults at most tested temperatures. The ratios of GAPDH activity to HOAD activity in female and male adults ranged from 1.99 to 3.31 at different temperatures, suggesting that the main carbohydrates are consumed in the respiratory metabolism of *O. asiaticus*.【Conclusion】In the tested temperature range of 18 – 42℃, the activities of respiratory metabolism-related enzymes and antioxidant enzymes in *O. asiaticus* adults first increase and then decrease with the increasing of temperature, and *O. asiaticus* adults adapt to temperature change by regulating the activities of respiratory metabolism-related and antioxidant enzymes.

Key words: *Oedaleus asiaticus*; temperature; respiratory metabolism; antioxidant enzyme; enzyme activity

温度与昆虫个体发育及种群的动态变化有密切联系,可对昆虫个体的生长发育、生存、行为、生殖等方面产生直接或间接的影响(Battisti *et al*., 2006; 陈丽芳等, 2015)。同时温度决定昆虫地理分布(Umina *et al*., 2005)、发生期(Dingemanse and Kalkman, 2008)、种群丰富度(Yamamura *et al*., 2005)等。温度是影响昆虫生长发育的主要生态因子,适宜的环境温度有利于昆虫生长发育,酶和激素的活性较强,可缩短昆虫产卵时间和发育历期,加快其繁殖速度。当温度超过一定阈值时昆虫体内水分流失量大,体表蜡质层瓦解,体内水分平衡被打破,酶和激素的活性受到抑制甚至是破坏, 极端高温会对昆虫造成胁迫, 严重时直接导致昆虫死亡(Hallman and Denlinger, 1998; 杜尧等, 2007)。当环境温度不适宜时昆虫主要通过行为和生理两种途径来适应和抵御不良环境,行为上主要通过改变呼吸频率、取食量和交配期等来适应胁迫;生理上通过调节代谢机制进行自我保护。昆虫抵御温度胁迫的代谢水平主要包括呼吸代谢水平和抗氧化代谢水平。呼吸代谢一般是指由多种酶、辅酶以及一些其他因素参与的消耗能源物质的一系列酶反应过程(陈菊红等, 2018);能源物质消耗过程所涉及酶包括糖类代谢相关酶 3-磷酸甘油醛脱氢酶(GAPDH)和 3-磷酸甘油脱氢酶(GDH),脂肪代谢相关酶 3-羟酰辅酶 A 脱氢酶(HOAD)以及参与三羧酸循环的柠檬酸合成酶(CS),其中 GAPDH 是糖酵解的一种关键酶, 且 GAPDH 与 HOAD 活性的比值可判断昆虫呼吸代谢消耗的能源物质类型(Beenakkers *et al*., 1984; 袁瑞玲等, 2015)。抗氧化代谢中的抗氧化保护酶主要包括超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)等, 外界环境对昆虫机体产生刺激或造成胁迫时,昆虫体内活性氧急速增加,此时机体内产生一系列酶作用的抗氧化生化反应,SOD 在昆虫体内能够特异清除超氧阴离子自由基并产生 H_2O_2 和 O_2,CAT 和 POD 可进一步分解清除 H_2O_2,此三者共同作用维护机体内活性氧代谢平衡(唐维媛等, 2016)。研究温度对昆虫代谢相关酶活性的影响, 能够掌握昆虫适宜生存的地理范围及其对极端气候条件的适应机制,为昆虫种群动态预测提供科学依据。

亚洲小车蝗 *Oedaleus asiaticus* 隶属直翅目(Orthoptera)蝗总科(Acridoidea)斑翅蝗科(Oedipodidae)斑翅蝗亚科(Oedipodinae)小车蝗属 *Oedaleus*,是我国北方地区为害最为严重的优势种蝗虫之一(高书晶等, 2016)。该虫取食包括禾本科、莎草科植物等 12 种左右草类(康乐和陈永林, 1994)。牧草被蝗虫啃食后,草场快速枯黄,地表大面积裸露,对草原生态环境带来不良后果,同时严重影响畜牧业可持续发展(李万春等, 2004; 李广, 2007)。亚洲小车蝗具有远距离迁飞习性,全球气候变暖导致其分布区域扩大、越冬存活率增加、发生期提前等发生规律变化,给防治工作带来了极大困难(杜桂林等, 2018)。亚洲小车蝗属变温动物,自身对温度具有一定的调节能力,其体温会随环境温

度发生改变,适宜的环境温度有利于其生长发育和繁殖,高温或低温会抑制发育(倪绍祥等, 2000)。亚洲小车蝗不同发育期对温度的需求不同,大多数对亚洲小车蝗的研究实验中将 23 ~29℃设为其成虫期生长发育的适宜温度。温度还影响亚洲小车蝗的取食和产卵等生命活动(张未仲, 2013),有研究表明温度增加 1 ~2℃可促进毛足棒角蝗 *Dasyhippus barbipes*, 亚洲小车蝗 *Oedaleus asiaticus* 和小翅雏蝗 *Chorthippus fallax* 卵和蝗蝻的发育, 分布区出现向北扩散的趋势(Guo *et al*., 2008)。在当前全球气候变化的背景下亚洲小车蝗的局部发生和扩散现象普遍存在,为了明确气候变化对亚洲小车蝗种群发生与为害的影响及亚洲小车蝗适应不同温度过程中的能量消耗和分配策略,从而预测其应对胁迫环境时能量代谢途径调控的机制。本研究探讨了 18 ~42℃温度范围内亚洲小车蝗成虫呼吸代谢相关酶和抗氧化酶活性,解析温度变化下各代谢水平的酶学机制及其消耗能源物质种类,以期为揭示气候变暖条件下蝗虫适应机理及为有效监测其发生危害和迁飞扩散提供理论依据和参考。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

供试亚洲小车蝗采集于内蒙古自治区四子王旗(41°52′N, 111°56′E)和镶黄旗(42°10′N, 114°24′E)。采集后于养虫笼中自然条件下饲养,每日取等量新鲜玉米叶和小麦苗并辅以少量麦麸喂食,饲养至成虫备用。雌雄虫在蝗蝻期不易辨别,成虫期形态有所差异。雌性成虫体型较雄性大, 且腹部末端有明显的瓣状产卵器,雄性腹部末端细长闭合略呈尖状。

1.2 亚洲小车蝗体内相关酶提取及活性测定

选取体型相似且健壮的亚洲小车蝗 4 日龄雌雄成虫个体, 将试虫于 18 ~42℃以 3℃为间隔, 设置 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39 和 42℃共 9 个温度梯度,人工气候箱中无光处理 4 h(确保试虫处于静息状态),后于室温条件下恢复 1 h。统计各处理试虫死亡率并用液氮处死后于 -80℃冰箱保存。每一温度处理 20 头虫(♀∶♂ =1∶1),各温度处理设置 3 个重复。

-80℃冰箱中逐个取出待处理蝗虫去除其头、足、翅等部位只保留胸部和腹部, 在预先冷处理过的手持匀浆器加入液氮后迅速将蝗虫躯干磨碎并倒入 1.5 mL 离心管中, 加入配制好的预先冷处理的提取液(1∶1, v/v, 提取液试剂盒内附)后震荡离心管 30 s 使其充分混匀, 冰上静置 10 min 后重复震荡 2 ~3 次得到组织匀浆。将匀浆在 4℃ 10 000 r/min 条件下离心 15 min,离心完成后仔细取其上清液至干净的 1.5 mL 离心管中,此上清液即为测试酶提取液。GAPDH, GPDH 和 HOAD 试剂盒由北京天根生化科技有限公司生产提供,CS, SOD, CAT 和 POD 试剂盒由上海酶联生物科技有限公司提供。酶液提取后利用考马斯亮蓝 G-250 试剂测定,酶标分析仪(Spectra Max Plus 384)在 595 nm 波长下测量相应酶吸光度 OD 值。

样品酶活力的计算: (1)标准曲线制作: 标准品的酶活力分别为 0, 3, 6, 12, 24 和 48 U/L, 测定标准品的 OD 值, 然后以酶活力为纵坐标, 测定的 OD 值为横坐标绘制标准曲线, 7 种酶的标准曲线分别为 HOAD: $y = 25.374x - 2.5537$ ($R^2 = 0.9995$); GAPDH: $y = 63.628x - 3.5416$ ($R^2 = 0.9971$); GPDH: $y = 77.22x - 3.9655$ ($R^2 = 0.9972$); CS: $y = 53.34x - 0.9483$ ($R^2 = 0.9941$); POD: $y = 197.01x + 2.6958$ ($R^2 = 0.9901$); SOD: $y = 117.34x - 1.8484$ ($R^2 = 0.9961$); CAT: $y = 42.969x - 2.7767$ ($R^2 = 0.9988$)。(2)计算样品酶活力: 将测定的样品 OD 值代入不同酶的标准曲线计算出样品酶活力(U/L),再乘以稀释倍数,即为样品实际酶活力(U/L)。(3)样品折算酶活力的计算: 样品折算酶活力(U/g FW) = 样品实际酶活力/组织匀浆, 组织匀浆即为 100 g FW/L。以样品折算酶活力作为结果中样品的酶活性。

1.3 数据分析

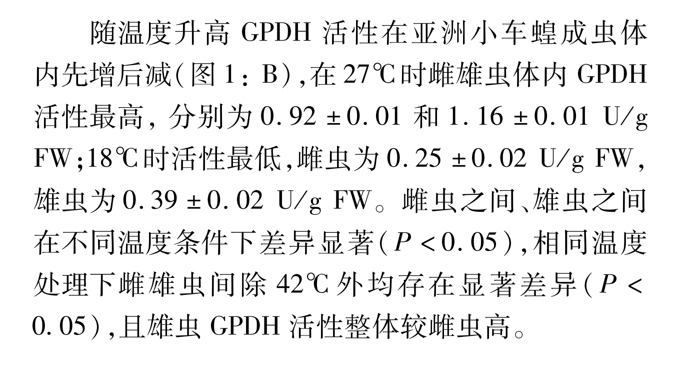
采用 DPS 数据处理系统 v15.10 对数据进行处理。使用单因素方差分析(ANOVA)对 9 个处理温度下亚洲小车蝗成虫呼吸代谢相关酶活性数据进行方差分析,并采用最小显著差异(LSD)法对其差异显著性进行多重比较;同一处理温度下亚洲小车蝗雌、雄成虫间呼吸代谢及抗氧化相关酶活性的差异显著性采用 *t* 检验法进行分析。

2 结果

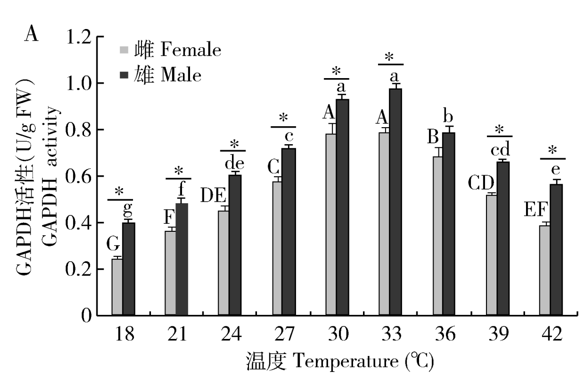
2.1 温度对亚洲小车蝗成虫体内糖类代谢酶活性的影响

温度的改变引起亚洲小车蝗雌雄成虫体内糖类代谢酶 GAPDH 活性发生改变, 在 18 ~42℃范围内温度不断升高过程中, 酶活性呈先增后减的趋势(图 1: A)。不同温度处理下雌雄虫酶活性均在

33℃时达最大值，分别为 0.79 ±0.02 和 0.97 ±0.02 U/g FW；雌雄虫酶活性都于 18℃呈最低值，分别为 0.24 ±0.02 和 0.39 ±0.02 U/g FW。不同温度处理下，亚洲小车蝗体内 GAPDH 活性在雌虫之间、雄虫之间存在显著差异（$P<0.05$）；同一温度处理下，雌雄虫间 36℃下无显著差异（$P>0.05$），其他温度下差异显著（$P<0.05$）。该实验温度条件下雄虫体内 GAPDH 活性普遍高于雌虫。



随温度升高 GPDH 活性在亚洲小车蝗成虫体内先增后减（图 1：B），在 27℃时雌雄虫体内 GPDH 活性最高，分别为 0.92 ±0.01 和 1.16 ±0.01 U/g FW；18℃时活性最低，雌虫为 0.25 ±0.02 U/g FW，雄虫为 0.39 ±0.02 U/g FW。雌虫之间、雄虫之间在不同温度条件下差异显著（$P<0.05$），相同温度处理下雌雄虫间除 42℃外均存在显著差异（$P<0.05$），且雄虫 GPDH 活性整体较雌虫高。



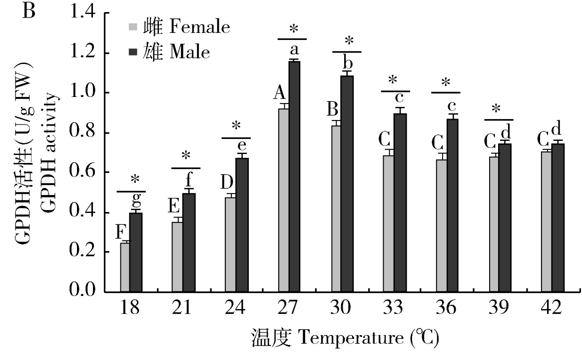


图 1　不同温度下亚洲小车蝗成虫体内的 GAPDH（A）和 GPDH（B）活性

Fig. 1　GAPDH (A) and GPDH (B) activities in *Oedaleus asiaticus* adults at different temperatures

成虫接受温度处理 4 h，室温下恢复 1 h。图中数据为平均值 ± 标准误；柱上不同大小写字母分别表示不同温度下雌虫和雄虫体内酶活性差异显著（LSD 检验，$P<0.05$）；星号代表同一温度下雌雄成虫间酶活性差异显著（$P<0.05$，独立样本 t 检验）。The adults were subjected to temperature treatment for 4 h and recovered at the room temperature for 1 h. Data in the figure are mean ± *SE*. Different capital and small letters above bars indicate significant difference in the enzyme activity of female and male adults at different temperatures, respectively ($P<0.05$, LSD test), and the asterisk represents significant difference in the enzyme activity between female and male adults at the same temperature ($P<0.05$, independent samples t-test). 下图同 The same for the following figures.

2.2　温度对亚洲小车蝗成虫体内脂类代谢酶活性的影响

温度显著影响亚洲小车蝗成虫体内脂类代谢酶 HOAD 活性（图 2）。亚洲小车蝗体内 HOAD 活性在 18 ~42℃范围内呈现先增后减的变化趋势。不同温度处理下雌雄虫 HOAD 活性均在 33℃达最大值，分别为 0.36 ±0.01 和 0.38 ±0.01 U/g FW；在 18℃时呈最小值，分别为 0.09 ±0.01 和 0.12 ±0.01 U/g FW。不同温度处理下雌虫之间、雄虫之间 HOAD 活性在 39 和 42℃差异不显著（$P>0.05$），其他温度处理下差异显著（$P<0.05$）；同一处理温度下 HOAD 活性在 24，27，33 和 36℃下雌雄虫间差异不显著（$P>0.05$），其他处理温度下差异显著（$P<0.05$）。

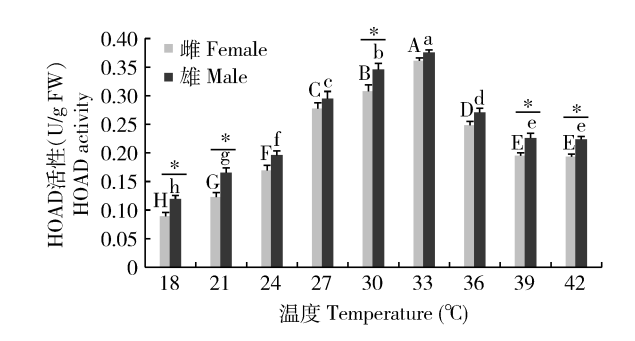


图 2　不同温度下亚洲小车蝗成虫体内的 HOAD 活性

Fig. 2　HOAD activities in *Oedaleus asiaticus* adults at different temperatures

2.3　温度对亚洲小车蝗成虫体内三羧酸循环关键酶活性的影响

温度显著影响亚洲小车蝗成虫体内 CS 活性（图 3）。随温度升高亚洲小车蝗成虫体内 CS 活性呈现先增后减的变化趋势，不同处理温度下雌雄虫 CS 活性均在 39℃达到最大值，分别为 0.84 ±0.03 和 0.92 ±0.01 U/g FW；雌虫 CS 活性均在 21℃时出现最小值，为 0.48 ±0.01 U/g FW，雄虫在 18℃时呈现最小值，为 0.55 ±0.02 U/g FW；不同处理下雌虫之间、雄虫之间 CS 性差异显著（$P<0.05$）。同一处理温度下 21 和 39℃处理下雌雄虫间 CS 活性差异显著（$P<0.05$），其他温度下差异不显著（$P>0.05$）。

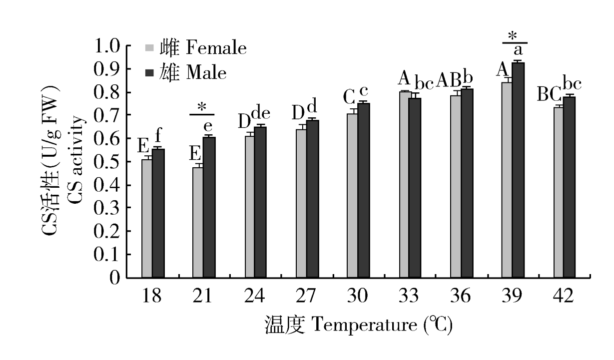


图 3　不同温度下亚洲小车蝗成虫体内的 CS 活性

Fig. 3　CS activities in *Oedaleus asiaticus* adults at different temperatures

2.4　不同温度下亚洲小车蝗成虫体内呼吸代谢能源物质的利用

糖类和脂肪是昆虫生理活动中主要利用的能源物质,GAPDH 与 HOAD 活性比值一直被作为判断其能量利用类型的指标(Beenakkers, 1969; 韩兰芝等, 2005),即两者比值远大于 1 时能量代谢为糖类利用型,小于 1 时为脂类利用型。如表 1 结果所示,在 18 ~42℃温度下亚洲小车蝗成虫体内 GAPDH 活性与 HOAD 活性之比雌虫比值范围为 1.99 ~2.93,雄虫比值范围为 2.43 ~3.31。比值远大于 1 说明此实验条件下亚洲小车蝗雌雄虫能量利用类型均为糖类利用型。

表 1　不同处理温度下亚洲小车蝗成虫体内 GAPDH 与 HOAD 活性比值

Table 1　Ratios of the GAPDH activity to the HOAD activity in *Oedaleus asiaticus* adults at different temperatures

性别 Sex	GAPDH/HOAD 活性比 Ratio of the GAPDH activity to the HOAD activity								
	18℃	21℃	24℃	27℃	30℃	33℃	36℃	39℃	42℃
雌 Female	2.71	2.93	2.65	2.08	2.53	2.18	2.74	2.64	1.99
雄 Male	3.31	2.93	3.08	2.43	2.68	2.60	2.90	2.91	2.52

2.5　温度对亚洲小车蝗成虫体内抗氧化酶活性的影响

温度显著影响亚洲小车蝗成虫体内 SOD, POD 和 CAT 3 种抗氧化酶活性(图 4: A, B, C)。18 ~42℃温度范围下亚洲小车蝗体内 3 种抗氧化酶活性随温度不断升高, 均呈现先增后减的变化趋势。SOD, POD 和 CAT 活性均于 30℃时达最大值,雌虫分别为 1.73 ±0.01, 3.04 ±0.05 和 0.71 ±0.03 U/mg FW, 雄虫分别为 1.67 ±0.04, 3.43 ±0.09 和 0.74 ±0.02 U/mg FW; 18℃时出现最小值,雌虫分别为 0.85 ±0.04, 1.93 ±0.05 和 0.40 ±0.01 U/mg FW,雄虫分别为 0.92 ±0.01, 2.18 ±0.02 和 0.45 ±0.01 U/mg FW。

3 种抗氧化酶活性在大多数温度下雌雄虫间均存在显著差异。同一温度处理下 SOD 活性在 18 和 30℃处理温度下雌雄虫间差异不显著($P>0.05$),其他同一处理温度下雌雄虫间均存在显著差异($P<0.05$)。同一温度下雌雄虫之间 POD 活性在 21, 24, 27 和 39℃处理下差异不显著($P>0.05$),其他处理下差异显著($P<0.05$)。雄虫 POD 活性整体较雌虫高。同一温度下雌雄虫之间 CAT 活性在 24, 36 和 39℃处理下差异不显著($P>0.05$),其他处理下差异显著($P<0.05$)。

3　结论与讨论

昆虫是变温动物的一个类群,自身保持和调节体内温度的能力非常弱(杜尧等, 2007),环境温度是决定昆虫种群数量、个体新陈代谢速率及繁殖速率等极为重要的生态因子,它影响昆虫的整个生命历程, 同时对昆虫的生活习性、地理分布等发挥重要作用(李瑾, 2012)。生物与环境的相互作用包括生物对环境温度的适应过程, 生物体可通过各种方式来适应环境温度的变化,本实验测定分析了在 18 ~42℃下亚洲小车蝗成虫体内 4 种呼吸代谢相关酶和 3 种抗氧化酶活性的变化, 研究表明,温度的改变能引起亚洲小车蝗成虫代谢相关酶活性的变化,随着温度升高 7 种呼吸代谢相关酶和抗氧化酶均呈现先增后减的趋势。糖类代谢相关酶 GAPDH 和 GPDH 分别在 33 和 27℃达最大值(图 1),脂类代谢酶 HOAD 活性在 33℃时达最大值(图 2),抗氧化相关酶 SOD, CAT 和 POD 均于 30℃时呈现最大值(图 4),CS 活性在 39℃时达最大(图 3)。已有研究指出在适宜的温度范围内,随着温度升高,昆虫体内呼吸代谢增强, 酶活性增加(李克斌和罗礼智, 1999; 高峰等, 2007; 陈爱端等, 2011; 李娟等,

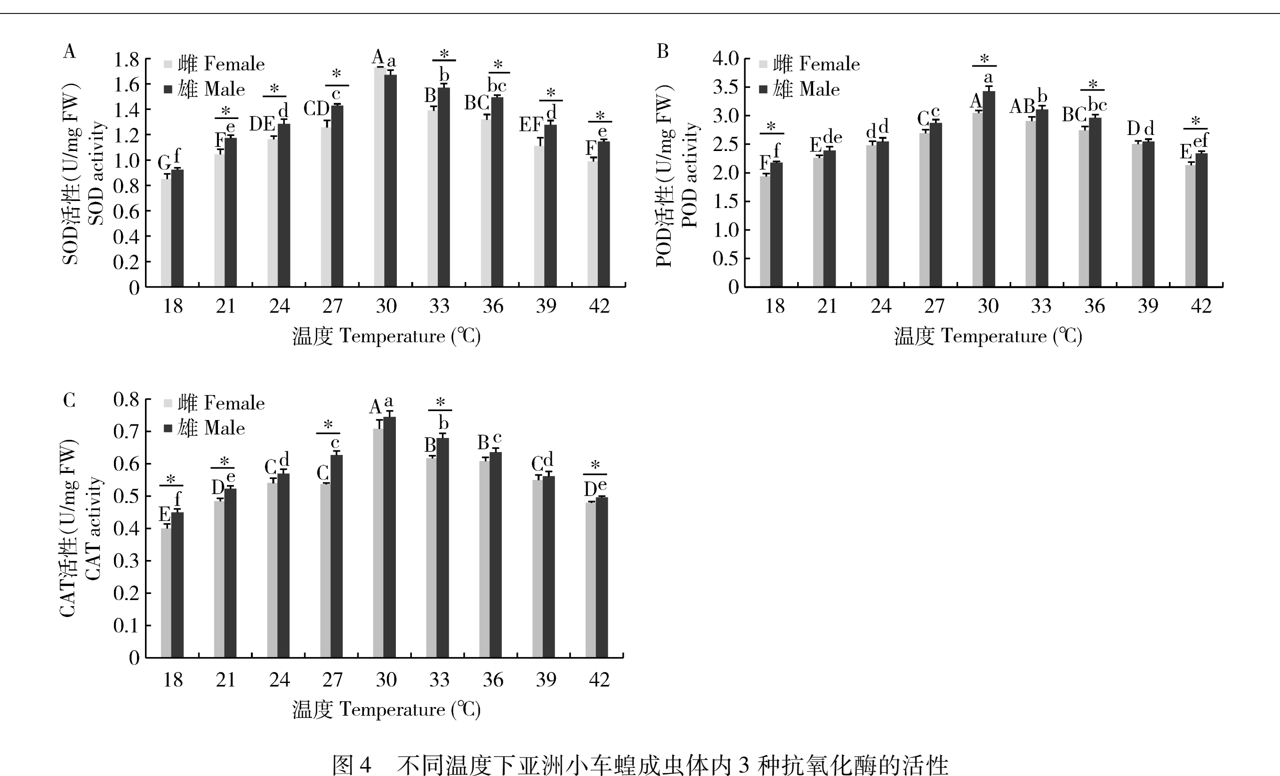


图 4　不同温度下亚洲小车蝗成虫体内 3 种抗氧化酶的活性

Fig. 4　Activities of three antioxidant enzymes in *Oedaleus asiaticus* adults at different temperatures

A：SOD；B：POD；C：CAT.

2014；王冬梅等，2014）当温度超过适宜的温度范围，昆虫的生命活动就会减弱。本实验结果与上述结论相符。实验中 7 种酶在 18 ~ 42℃范围内的整体变化趋势为先增后减，温度在 27 ~ 33℃时其体内呼吸代谢相关酶活性不断增加，体内对糖类和脂类物质的利用能力逐渐增强；低温和高温使亚洲小车蝗成虫受到环境胁迫，能源物质代谢速率减慢，相应呼吸代谢相关酶活性降低，说明亚洲小车蝗对低温和高温的抵抗能力减弱，机体活力较弱，对环境的适应性不强（钱雪等，2017）。

在 18 ~ 42℃温度处理下，亚洲小车蝗雄虫体内代谢相关酶活性普遍高于雌虫（图 1 ~ 4），这表明雄成虫对糖代谢、脂代谢及抗氧化能力都强于雌成虫，同时在能量利用分析结果中雄成虫的 GAPHD 与 HOAD 比值整体上高于雌虫（表 1），可初步推断雄虫在一般情况下其代谢消耗糖类的量较雌虫大且所消耗糖类的比例较脂类大很多，这可能是雌雄虫体代谢机制存在微差异，这是否与雌虫卵巢发育和抵御温度胁迫间的能量分配有关还需要进一步验证。糖类是昆虫生理活动消耗的主要能源物质，昆虫受到温度及其他环境因子胁迫时，可以通过改变消耗能源物质类型来增强自身对环境的抵抗能力（张洁等，2013）。钱雪等（2017）研究发现，西伯利亚蝗 *Comphocerus sibiricus* 雌虫在低温环境下主要消耗糖类，高温环境下可以同时消耗糖类和脂类，说明高温胁迫下，糖类和脂类可以为西伯利亚蝗提供更多的能量。本研究对亚洲小车蝗能量利用分析发现雌雄成虫在 18 ~ 42℃温度下消耗的能源物质始终为糖类，与上述西伯利亚蝗的能量分配策略不同，这可能由实验处理的时间和其环境因素所致，也不排除其自身的代谢机制在种与种之间的差异性，关于这一点有待进一步研究。

气候变化已成为国内外最受关注的热点问题（孙玉诚等，2017）。气候格局的改变会导致昆虫地理分布格局及灾变规律的重大改变（Logan and Powell，2001；Kharouba *et al*.，2019）。本研究中亚洲小车蝗呼吸代谢相关酶活性基本在 27 ~ 33℃范围内达最大值（图 1），说明此温度范围中虫体能源物质的代谢速率快，生命活动旺盛；亚洲小车蝗体内 3 种抗氧化酶活性均在 30℃时达最大值（图 4），SOD 在生物体内的主要作用是清除超氧阴离子自由基并将其转化为过氧化氢，CAT 和 POD 则将过氧化氢分解为 H_2O 和 CO_2，3 种酶共同作用抵抗生物体氧化过程。抗氧化酶活性的增加是蝗虫受到外界环境刺激时表现出来的一种应激反应，该研究结果表明 30℃时虫体内过氧化物水平较高，已经对虫体形成胁迫，随温度继续升高，虫体内增加的有害物质如活性氧等超过虫体内抗氧化酶的代谢范围，将导

致虫体生理功能紊乱,酶活性受到抑制而下降,虫体死亡率增加(An and Choi, 2010; Mahmud *et al*., 2010)。由此推断, 27 ~ 30℃是亚洲小车蝗各项生命活动高效运行的最适温度,气候条件的变化在此温度范围下仍有利于亚洲小车蝗的繁殖和扩散,加之亚洲小车蝗具有长距离迁飞习性,借助适宜的环境条件迁飞扩散危害,将加大防治难度。这对亚洲小车蝗的监测预警范围与防治决策都将产生重大影响。

参考文献(References)

An MI, Choi CY, 2010. Activity of antioxidant enzymes and physiological responses in ark shell, *Scpharca broughtonii*, exposed to thermal and osmotic stress: effects on hemolymph and biochemical parameters. *Comp. Biochem. Physiol. B Biochem. Mol. Biol*., 155(1): 34 – 42.

Battisti A, Stastny M, Buffo E, Larsson S, 2006. A rapid altitudinal range expansion in the pine processionary moth produced by the 2003 climatic anomaly. *Glob. Change Biol*., 12(4): 662 – 671.

Beenakkers AMTh, 1969. Carbohydrate and fat as a fuel for insect flight. A comparative study. *J. Insect Physiol*., 15(3): 351 – 362.

Beenakkers AMTh, Van der Horst DJ, Van Marrewijk WJA, 1984. Insect flight muscle metabolism. *Insect Biochem. Mol. Biol*., 14(3): 243 – 260.

Chen AD, Li KB, Yin J, Cao YZ, 2011. Effects of environmental factors on the respiratory metabolism in larvae of *Pleonomus canaliculatus* (Coleoptera: Elateridae). *Acta Entomol. Sin*., 54(4): 397 – 403. [陈爱端, 李克斌, 尹姣, 曹雅忠, 2011. 环境因子对沟金针虫呼吸代谢的影响. 昆虫学报, 54(4): 397 – 403]

Chen JH, Cui J, Zhang JP, Bi R, Gao Y, Xu W, Shi SS, 2018. Effects of temperature on the activities of key enzymes related to respiratory metabolism in *Riptortus pedestris* (Hemiptera: Coreidae) adults. *Acta Entomol. Sin*., 61(9): 1003 – 1009. [陈菊红, 崔娟, 张金平, 毕锐, 高宇, 徐伟, 史树森, 2018. 温度胁迫对点蜂缘蝽成虫呼吸代谢关键酶活性的影响. 昆虫学报, 61(9): 1003 – 1009]

Chen LF, Shao DH, Duan JP, Bai WJ, 2015. Influence of temperature on insects. *J. Inner Mongolia For. Sci. Technol*., 41(2): 57 – 61. [陈丽芳, 邵东华, 段景攀, 白玮杰, 2015. 温度对昆虫的影响. 内蒙古林业科技, 41(2): 57 – 61]

Dingemanse NJ, Kalkman VJ, 2008. Changing temperature regimes have advanced the phenology of Odonata in the Netherlands. *Ecol. Entomol*., 33(3): 394 – 402.

Du GL, Zhao HL, Tu XB, Zhang ZH, 2018. Division of the inhabitable areas for *Oedaleus decorus asiaticus* in Inner Mongolia. *Plant Prot*., 44(6): 24 – 31. [杜桂林, 赵海龙, 涂雄兵, 张泽华, 2018. 亚洲小车蝗在内蒙古草原宜生区划分研究. 植物保护, 44(6): 24 – 31]

Du Y, Ma CS, Zhao QH, Ma G, Yang HP, 2007. Effects of heat stress on physiological and biochemical mechanisms of insects: a literature review. *Acta Ecol. Sin*., 27(4): 1565 – 1572. [杜尧, 马春森, 赵清华, 马罡, 杨和平, 2007. 高温对昆虫影响的生理生化作用机理研究进展. 生态学报, 27(4): 1565 – 1572]

Gao F, Su JW, Ge F, Wu G, Liu XH, 2007. Effect of temperature on the respiration and metabolism of ladybeetles, *Propylaea japonica*. *Hubei Agric. Sci*., 46(4): 562 – 564. [高峰, 苏建伟, 戈峰, 吴刚, 刘向辉, 2007. 温度对龟纹瓢虫呼吸代谢的影响. 湖北农业科学, 46(4): 562 – 564]

Gao SJ, Wei YS, Te ME, Liu AP, Xu LB, Wang N, 2012. The flight capacity of *Oedaleus asiaticus* and its relation to population density. *Pratacult. Sci*., 29(12): 1915 – 1919. [高书晶, 魏云山, 特木儿, 刘爱萍, 徐林波, 王宁, 2012. 亚洲小车蝗飞行能力及其与种群密度的关系. 草业科学, 29(12): 1915 – 1919]

Guo K, Hao SG, Sun JX, Kang L, 2008. Differential responses to warming and increased precipitation among three contrasting grasshopper species. *Glob. Change Biol*., 15(10): 2539 – 2548.

Hallman GJ, Denlinger DL, 1998. Temperature Sensitivity in Insects and Application in Integrated Pest Management. Westview Press, Boulder.

Han LZ, Zhai BP, Zhang XX, Liu PL, 2005. Activity of enzymes related to energy metabolism in the flight muscle of beet armyworm. *Acta Ecol. Sin*., 25(5): 1101 – 1106. [韩兰芝, 翟保平, 张孝羲, 刘培磊, 2005. 甜菜夜蛾飞行肌中与能量代谢有关的酶活性. 生态学报, 25(5): 1101 – 1106]

Kang L, Chen YL, 1994. Trophic niche of grasshoppers within steppe ecosystem in Inner Mongolia. *Acta Entomol. Sin*., 37(2): 178 – 179. [康乐, 陈永林, 1994. 草原蝗虫营养生态位的研究. 昆虫学报, 37(2): 178 – 179]

Kharouba HM, Lewthwaite JMM, Guralnick R, Vellend M, 2019. Using insect natural history collections to study global change impacts: challenges and opportunities. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci*., 374(1763): 20170405.

Li G, 2007. The Loss Assessment of Grassland Caused by *Oedaleus decorus asiaticus*. MSc Thesis, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing. [李广, 2007. 亚洲小车蝗为害草场损失估计分析的研究. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文]

Li J, 2012. Studies on Cold Hardiness of the Eggs of *Pararcyptera micropterameridionalis* (Ikonnikov) and *Oedaleus asiaticus* B. Bienko. MSc Thesis, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot. [李瑾, 2012. 宽翅曲背蝗和亚洲小车蝗卵的抗寒性研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学硕士学位论文]

Li J, Li S, Wang DM, Ji R, 2014. Changes in contents of stress resistant substances in *Gomphocerus sibiricus* (Orthoptera: Acrididae) under high temperature stress. *Acta Entomol. Sin*., 57(10): 1155 – 1161. [李娟, 李爽, 王冬梅, 季荣, 2014. 高温胁迫下西伯利亚蝗体内抗逆物质含量变化. 昆虫学报, 57(10): 1155 – 1161]

Li KB, Luo LZ, 1999. Activities of enzymes in the flight muscle of pupal and adult oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker). *Acta Entomol. Sin*., 42(1): 37 – 43. [李克斌, 罗礼智, 1999. 粘虫飞行肌中与能量代谢有关的酶活性研究. 昆虫学报, 42(1): 37 – 43]

Li WC, Zhang LQ, Jia XL, Zhang YS, 2004. Some understandings of grasshopper control in grassland. *Plant Prot.*, 30(3): 84-85. [李万春, 张连庆, 贾晓玲, 张永胜, 2004. 对草原蝗虫防治工作的几点认识. 植物保护, 30(3): 84-85]

Logan JA, Powell JA, 2001. Ghost forests, global warming, and the mountain pine beetle (Coleoptera: Scolytidae). *Am. Entomol.*, 47(3): 160-173.

Mahmud SA, Hirasawa T, Shimizu H, 2010. Differential importance of trehalose accumulation in *Saccharomyces cerevisiae* in response to various environmental stresses. *J. Biosci. Bioeng.*, 109(3): 262-266.

Ni SX, Jiang JJ, Wang JC, Gong AQ, Wang WJ, Voss F, 2000. Environmental conditions affecting grasshopper epidemic in the region around Qinghai Lake. *Acta Pratacult. Sin.*, 9(1): 43-47. [倪绍祥, 蒋建军, 王杰臣, 巩爱歧, 王薇娟, Voss F, 2000. 青海湖地区草地蝗虫发生的生态环境条件浅析. 草业学报, 9(1): 43-47]

Qian X, Wang YY, Xie HH, Dou J, Li ZW, Jashenko R, Ji R, 2017. Effects of temperature on the activities of key enzymes related to respiratory metabolism in adults of *Gomphocerus sibiricus* (Orthoptera: Acrididae). *Acta Entomol. Sin.*, 60(5): 499-504. [钱雪, 王月莹, 谢欢欢, 窦洁, 李占武, Jashenko R, 季荣, 2017. 温度对西伯利亚蝗呼吸代谢关键酶活性的影响. 昆虫学报, 60(5): 499-504]

Sun YC, Guo HJ, Ge F, 2017. Progress in research on the responses of insects to global climate change. *Chin. J. Appl. Entomol.*, 54(4): 539-552. [孙玉诚, 郭慧娟, 戈峰, 2017. 昆虫对全球气候变化的响应与适应性. 应用昆虫学报, 54(4): 539-552]

Tang WY, Qiang FQ, Xing CC, Dong YG, Zhang YM, 2016. Research progress of adverse environmental stress on antioxidant enzymes in insects. *Guizhou Agric. Sci.*, 44(1): 75-79. [唐维媛, 强奉群, 邢丛丛, 董永刚, 张义明, 2016. 不利环境对昆虫抗氧化酶影响的研究进展. 贵州农业科学, 44(1): 75-79]

Umina PA, Weeks AR, Kearney MR, McKechnie SW, 2005. A rapid shift in a classic clinal pattern in *Drosophila* reflecting climate change. *Science*, 308(5722): 691-693.

Wang DM, Li J, Li S, Hu HX, Ji R, 2014. Effects of temperature on the respiratory metabolism of *Calliptamus italicus* (Orthoptera: Acrididae). *Acta Entomol. Sin.*, 57(3): 373-378. [王冬梅, 李娟, 李爽, 扈鸿霞, 季荣, 2014. 温度对意大利蝗呼吸代谢的影响. 昆虫学报, 57(3): 373-378]

Yamamura K, Yokozawa M, Nishimori M, Ueda Y, Yokosuka T, 2005. How to analyze long-term insect population dynamics under climate change: 50-year data of three insect pests in paddy fields. *Popul. Ecol.*, 48(1): 31-48.

Yuan RL, Wang XW, Yang S, Chen P, 2015. Changes in the activities of enzymes related to energy metabolism in flight muscles of adult *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae) at different ages and during tethered flight. *Acta Entomol. Sin.*, 58(5): 471-478. [袁瑞玲, 王晓渭, 杨珊, 陈鹏, 2015. 不同日龄和吊飞过程中桔小实蝇成虫飞行肌能量代谢相关酶活性的变化. 昆虫学报, 58(5): 471-478]

Zhang J, Qin XW, Zheng X, Dong JH, Zhang ZK, 2013. Effects of SRBSDV-infected rice on the accumulation of energy substances of the virus vector, *Sogatella furcifera* (Horváth). *J. Environ. Entomol.*, 35(5): 597-602. [张洁, 秦小娃, 郑雪, 董家红, 张仲凯, 2013. 饲食感染 SRBSDV 的水稻病株对传毒介体白背飞虱相关能源物质含量的影响. 环境昆虫学报, 35(5): 597-602]

Zhang WZ, 2013. The Study of Environmental Suitability and Gene of Metabolism of *Oedaleus decorus asiaticus* in Different Habitats. PhD Dissertation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing. [张未仲, 2013. 亚洲小车蝗生境适应性及代谢相关基因研究. 北京: 中国农业科学院博士学位论文]

（责任编辑：赵利辉）